

文章编号: 1009- 038X(2000) 06- 0587- 04

废水生物处理生化反应的建模和辨识

张 勇, 吴铁军

(浙江大学工业控制技术国家重点实验室, 浙江杭州 310027)

摘 要: 为废水处理过程建立 个准确的数学模型和对模型进行辨识的重要性是不言而喻的. 本研究尝试用非线性最小二乘法对 种废水生物处理的数学模型进行辨识, 从而为废水处理厂生产和控制的正常进行提供帮助. 仿真结果表明, 本研究采用的这种模型辨识效果良好.

关键词: 模型; 废水生物处理; 活性污泥法; 系统辨识; 非线性最小二乘法

中图分类号: TP183

文献标识码: A

Modeling and Identification of Biological Wastewater Treatment Process

ZHANG Yong, WU Tie-jun

(National Laboratory for Industrial Control Technology, Zhejiang University, Hangzhou 310027)

Abstract: Modeling and identification are very important for the biological wastewater treatment process. This paper focused on the identification of a model for biological wastewater treatment process using nonlinear least square method. It is very useful for the wastewater treatment plants. Simulation results showed that the identification algorithm was very effective.

Key words: model; biological wastewater treatment; activated sludge process; system identification; nonlinear least square

城市生活和工业废水处理是环境保护领域的一个重要课题, 生化方法在这方面取得了很广泛的应用. 废水的水质测量的重要指标之一是废水生化耗氧量, 即 BOD. 所谓 BOD 是指水中的好氧菌在将水中的有机废物氧化分解的过程中消耗的水中的溶解氧的量. 废水生物处理的基本思想就是利用微生物的新陈代谢作用将废水中能危害环境的有害物质吸收转化掉, 降低废水的 BOD, 从而实现废水的无害化处理. 一般来说, 采用生物处理法进行废水的无害化处理, 较其他方法是比较经济的, 而且处理效率高, 技术也比较成熟. 因此, 在可能的情况下, 首先应考虑采用生物处理法. 活性污泥法作为

生物处理方法的典型代表, 在城市生活和工业废水的二级处理中占有重要的地位.

众所周知, 微生物作为一种生命体, 其行为受到种群、数量、温度、pH 等众多因素的影响, 表现出极强的非线性, 很难建立一个模型进行描述. 同时, 由于没有一个合适的仪器仪表能够对废水中的有机物含量, 即 BOD 作实时的监测, 因此对城市废水处理生化反应实施自动控制的难度非常大. 在这种情况下, 很多废水处理厂都是利用生产人员的经验来进行控制, 自动化水平很低, 直接后果就是出水水质无法得到保证以及能源的巨大消耗. 但是随着社会的发展和生产力的进步, 这种生产方式已经不

收稿日期: 2000- 01- 20; 修订日期: 2000- 09- 16.

作者简介: 张勇(1975-), 男, 江苏邗江人, 控制科学与工程硕士研究生.

能满足社会的要求了,对废水生物处理实施自动控制的要求也就越来越迫切.如果能建立一个数学模型对废水生物处理过程进行准确的描述,并结合先进的软测量技术,就能实时的估计出废水中的BOD含量,实现对废水生物处理过程的反馈控制,大大提高自动化水平,从而降低系统运行成本、保证废水排放质量、实现少人/无人值守等目标.

生物化学反应速度取决于酶的催化活性,1913年米凯利斯和门坦提出了著名的米—门公式来描述酶化学反应的速度.莫诺(Monod)于1942年将米—门公式应用到微生物增长上,提出了类似的公式来描述营养物浓度和微生物增殖之间的关系.这个公式为用纯培养菌在纯化合物中的生化实验所证实,后来又被引进到污水处理领域,用具有异质微生物群体的活性污泥对单一底物进行实验,发现也基本符合这种关系^[1,2].此后,以Monod公式为基础,提出了很多模型来描述污水生物处理系统,这些模型的提出极大地促进了污水生物处理的发展.然而,这些模型有个共同的特点,即这些主要结果都是针对稳态过程的,模型的动力学参数的获取也是基于稳态过程的.为了获取这些参数,需要进行多次稳态生产实验,每次实验往往要延续2~4周^[3],消耗了大量的时间;另外还有人根据废水的批式处理生产工艺提出了一种利用微生物在新陈代谢中耗氧量的数据进行动力学参数辨识的方法^[4~6],这种方法只能用于间歇式的生产,而不适用于大规模连续生产过程.

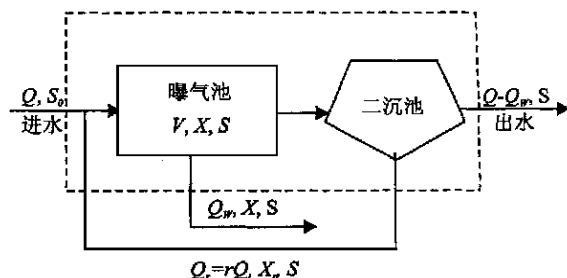
本研究是在一个动态模型的基础上,针对连续生产过程,只进行一次动态实验,就辨识出模型的所有动力学参数,这对节约时间和降低成本都是非常有意义的.

1 废水生物处理基本工艺过程

由于完全混合式活性污泥系统的生化反应过程易于数字化描述,在废水处理领域内有广泛的应用,其他类型的曝气池可以看成是由若干个完全混合曝气池串联而成.Grieves与Mibury等人的研究表明,推流式曝气池中的实验混合状态更接近完全混合^[7].因此,本文采用这种系统作为研究对象,其一般流程如图1所示.

曝气池实际上是一个废水生物处理反应器.在曝气池中,微生物在废水中溶解氧的作用下将BOD分解吸收,同时繁殖自身.二沉池主要功能是将曝气池出水中的微生物成分通过沉淀的方法从混合液中分离出来,并回流到曝气池中,同时保证干净

的出水. Q_w 的主要功能是将由于微生物的繁殖产生的多余的活性污泥排出系统,维持稳定的工作状态.



其中: Q 、 Q_w 、 Q_r 分别是进水、污泥排放、污泥回流的流量(m^3/d); X 、 X_r 分别是曝气池和污泥回流中污泥质量浓度(mg/L); S_0 、 S 分别是进水和出水的底物(BOD)质量浓度(mg/L); V 曝气池有效容积(m^3); r 污泥回流比.

图1 完全混合活性污泥法示意图

Fig. 1 Flow scheme of activated sludge process

2 模型的建立和辨识

劳伦斯—麦卡蒂模型是根据微生物生理学,即有关微生物的增殖和底物的利用为基础推演的.他们采用了一相说的概念,即认为微生物的增殖存在连续的关系.劳伦斯—麦卡蒂模式的突出特点是强调了生物固体停留时间这一概念的重要性及其在设计 and 运行中的意义,他们认为这是生物处理设计和运行的统一基础,并建立了它和微生物增殖、底物的利用、过程效率等方面的关系.由于劳伦斯—麦卡蒂模式的突出优点,它已经得到了环境工程学界的广泛认同.

根据劳伦斯—麦卡蒂模式的基本观点,针对图1中描述的完全混合处理系统,对虚框中的部分作物料平衡,并作如下两个假定:

- 1) 进水中的基质均为溶解性的,且不含微生物群体;
- 2) 二次沉淀池内无微生物活动,也无污泥积累,固液分离良好.

则有如下两个方程^[7,8]:

$$\frac{dX}{dt} = [Y_r \cdot \frac{k \cdot X \cdot S}{K_s + S} - K_d \cdot X] - \frac{Q_w \cdot X}{V} \quad (1)$$

$$\left(\frac{dS}{dt}\right) = \frac{Q(S_0 - S)}{V} - \frac{k \cdot X \cdot S}{K_s + S} \quad (2)$$

其中 Y_r 是细菌的产率(mg 细菌/ mg 有机物), k 是单位细菌的底物利用速度(mg 有机物/(mg 细菌 $\cdot \text{d}$)), K_d 是细菌的自然死亡率($1/\text{d}$); K_s 是饱和常数(mg/L).

式(1)说明, 细菌的变化量是流出容器的细菌量和细菌的实际生长量的迭加; 式(2)说明, 营养的变化量是进出容器的营养量和细菌消耗的营养的迭加.

辨识的目的就是通过若干次 S 、 Q 、 x 、 y 等实际测量数据的获得来估计系统中未知参数 Y_T , k , K_d , K_s 的估计值, 并利用它们的估计值获得 x 、 y 随时间和环境变化之间的关系, 从而可以预测 x 和 y 的值. 考虑到非线性最小二乘法问题实际上是一个无约束最优化问题, Newton 法是解决这种问题的常用方法. 这种方法的优点是收敛速度快, 和其他方法相比, 达到同样的精度所需要的迭代次数往往要少得多. 但是 Newton 法要求计算 Hessian 矩阵, 其计算过程是非常复杂的, 这给 Newton 法的应用带来了不便. 本研究采用在系统辨识领域常用的“改进 Gauss-Newton”算法来辨识未知参数. 和传统的 Newton 法相比, “改进 Gauss-Newton”算法给出了 Hessian 矩阵的近似公式, 从而大大简化了其计算过程.

对于系统 $Y = \phi(x, \beta) + \varepsilon$, 记偏差函数 $e(\beta) = Y - \phi(x, \beta)$, $e(\beta)$ 的 Jacobi 矩阵 $J(\beta) = \left[\frac{\partial e_i(\beta)}{\partial \beta_j} \right]$, 目标函数 $F(\beta) = 1/2 \cdot e'(\beta) \cdot e(\beta)$, “改进 Gauss-Newton”算法采用下列步骤辨识参数 β :

- 1) 选取初始点 $\beta^{(0)}$, 计算 $F_0 = \frac{1}{2} \sum_{i=1}^n e_i^2(\beta^{(0)})$, 置 $k = 0$.
- 2) 计算 $J_k(\beta) = \left[\frac{\partial e_i(\beta)}{\partial \beta_j} \right]$ 和 $b_j^k = \sum_{i=1}^n e_i(\beta^{(k)})$

$\frac{\partial e_i(\beta^{(k)})}{\partial \beta_j}, j = 1, 2, \dots, r$, 得 $b_k = (b_1^k, b_2^k, \dots, b_r^k)$.

3) $P_k = -(J_k' J_k)^{-1} b_k$, 令 $\hat{\beta}^{(k+1)} = \hat{\beta}^{(k)} + P_k$.

如果终止条件被满足, 则 $\hat{\beta} = \hat{\beta}^{(k+1)}$, 否则跳转至 2).

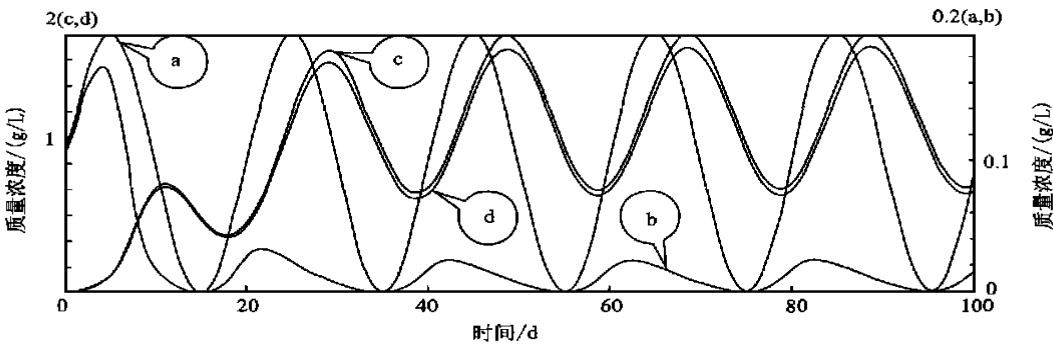
3 仿真与结果分析

由于本文的主要任务是要检验辨识算法对模型的适用性, 故采用 MATLAB 仿真软件在不同的条件下产生两组数据, 其中一组用于辨识, 一组用于检验辨识的结果是否合理. 产生这些数据的条件是这样的:

采用的参数设置是 $K_d = 0.05$, $K_s = 0.046$, $k = 1.5$, $Y_T = 0.58$, $V = 2\,500\text{ m}^3$, $Q_w = 250\text{ m}^3/\text{d}$, $Q = 10\,000\text{ m}^3/\text{d}$, 初始值 $s_0 = 0.15$, $x_0 = 0.01$. 考虑到待辨识系统是一个非线性系统, 为了充分激励, 采用频率是 0.05 Hz, 幅值 0.15 的方波作为流入曝气池的废水的浓度信号产生辨识用数据(其他条件保持不变), 采样间隔 0.1, 采样区间[0, 40]; 采用频率是 0.05 Hz, 幅值 0.1 的正弦波和幅度为 0.1 的阶跃作为流入曝气池的废水的浓度信号产生检验用数据(其他条件保持不变), 采样间隔 0.1, 采样区间是 [0, 100].

辨识结果是: $K_d = 0.05147$, $K_s = 0.04509$, $k = 1.5643$, $Y_T = 0.5543$, 见图 2.

结论: 辨识的结果是可以接受的, 采用的算法对模型是合适的.



其中 a 是输入信号曲线, b 是废水浓度曲线(仿真结果根据真实参数和仿真参数得到的废水浓度曲线几乎完全重合, 故略去一条), c 是根据真实参数仿真得到的微生物浓度曲线, d 对应的是采用同样的输入信号根据辨识的结果仿真得到的微生物浓度曲线, 真实曲线和辨识得到的曲线的绝对值平均误差是 $x = 0.0478$, $s = 0$.

图 2 辨识结果

Fig. 2 Simulation result

4 讨 论

在仿真中发现,要想得到满意的辨识的结果,迭代的出发点的选取是非常重要的.如果初始值偏离实际值太远,会造成迭代中出现严重的矩阵病态现象,导致辨识结果严重偏离实际值,甚至会导致迭代过程发散.然而在实际生产中,模型的参数都

有一个大致的取值范围,迭代的出发点就可以选取在这个范围内,这样就能保证不会和实际值相差太大,从而保证辨识结果的可信性.

本研究中的模型是一个经过简化的模型,它没有考虑 pH 值、溶解氧含量(DO)以及高浓度底物和有毒物质对活性污泥的生长的影响,这些问题有待今后进一步的研究来阐述.

参考文献

[1] 张自洁,周帆. 活性污泥生物学和反应动力学[M]. 北京: 中国环境科学出版社, 1989.

[2] 拉里·D·贝尼菲尔德,克里福德·W·兰德爾著. 废水生物处理过程设计[M]. 邢建,段宁译. 北京: 中国建筑工业出版社, 1984.

[3] 付国伟,程声通. 水污染控制系统规[M]. 北京: 清华大学出版社, 1985.

[4] JOANN SILVERSTEIN, RICHARDO MINES, JOSEPH H SHERRARD, *et al.* Activated sludge[J]. **Research Journal WPCF**, 1990(62): 398.

[5] DANG J S, HARVEY DM, ANDREA JOBAGY. Evaluation of biodegradation kinetics with respirometric data [J]. **Res J Water Poll Control Fed.** 1989(61): 1711.

[6] GRADY C P L, DANG J S, HARVERY D M. Determination of biodegradation kinetics through use of electrolytic respirometry [J]. **Water Sci Technol**, 1989, 21: 957.

[7] 彭永臻,王永贞,王淑莹等. 活性污泥的多变量最优控制I、II、III[J]. 环境科学学报, 1998(18): 1~ 2.

[8] 顾夏声. 废水生物处理数学模式[M]. 北京: 清华大学出版社, 1982.

[9] 高惠璇. 统计计算[M]. 北京: 北京大学出版社, 1995.

(责任编辑: 李春丽)

(上接第 573 页)

参考文献

[1] 邢卫红,徐南平,时钧. 无机膜分离技术在食品、发酵行业中的应用[J]. 膜科学与技术. 1997, 17(6): 1~ 9.

[2] MICHALS S L. Crossflow microfilters the ins and outs[J]. **Chem Eng**, 1989, 1: 84~ 89.

[3] 郑领英. 国外膜技术在食品工业中的应用现状和发展动向[J]. 水处理技术. 1994, 20(5): 248~ 253.

[4] HSIEH H P, BHAVE R R, FLEMING H L. Micropress alumina membranes[J]. **J Membr Sci**, 1998, 39: 221.

[5] PAHILLA-ZAKOUR O, MCLELLAN M R. Opitimization and modeling of apple juice cross flow microfiltration with a ceramic membrane[J]. **J Food Sci**, 1993, 58(2): 369~ 388.

[6] FUKUMOTO L R, DELAQUIS P, GIRARD B. Microfiltration and ultrafiltration ceramic membranes for apple juice clarification[J]. **J Food Sci**, 1998, 65(5): 845~ 850.

[7] 赵宜江,嵇鸣,张艳等. 陶瓷微滤膜澄清中药提取液的研究[J]. 水处理技术. 1999, 25(4): 199~ 203.

(责任编辑: 秦和平 李春丽)